

doi: 10.12029/gc20190618

刘远栋,李翔,徐磊,陈美君,刘凤龙,陈小友. 2019. 浙南龙泉地区晚侏罗世火山岩的厘定及成因探讨[J]. 中国地质, 46(6): 1530–1546.
Liu Yuandong, Li Xiang, Xu Lei, Chen Meijun, Liu Fenglong, Chen Xiaoyou. 2019. Identification and genesis of the Late Jurassic volcanic rocks in Longquan area, southern Zhejiang Province[J]. Geology in China, 46(6): 1530–1546(in Chinese with English abstract).

浙南龙泉地区晚侏罗世火山岩的厘定及成因探讨

刘远栋,李翔,徐磊,陈美君,刘凤龙,陈小友

(浙江省地质调查院,浙江 杭州 311203)

摘要:浙江晚中生代大规模火山活动始于晚侏罗世还是早白垩世,长期以来存在争议。本文对浙南龙泉地区火山岩进行了锆石 U–Pb 定年,获得一批高精度的年代学数据,其 SHRIMP 锆石 U–Pb 和 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄集中于 163~145 Ma,确认浙江晚中生代火山活动始于晚侏罗世。地球化学特征和 Sr–Nd 同位素特征表明这套晚侏罗世火山岩具有高硅、高钾、低磷、贫铁镁的特征,属于过铝质高钾钙碱性岩石系列。由于晚中生代太平洋板块的俯冲作用,导致了下部地壳物质(基底变质岩)广泛熔融,形成了本区晚侏罗世火山岩浆活动。为了便于表达、对比,笔者建议新建“晚侏罗世黄茅尖群”地层单位。

关键词: 锆石 U–Pb; 晚侏罗世; 火山岩; 浙南; 黄茅尖群; 地质调查工程

中图分类号:P588.14 文献标志码:A 文章编号:1000–3657(2019)06–1530–17

Identification and genesis of the Late Jurassic volcanic rocks in Longquan area, southern Zhejiang Province

LIU Yuandong, LI Xiang, XU Lei, CHEN Meijun, LIU Fenglong, CHEN Xiaoyou

(Geological survey Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 311203, Zhejiang, China)

Abstract: There has been controversy for a long time that the large-scale volcanic activity of Late Mesozoic in Zhejiang Province began with Late Jurassic or Early Cretaceous? Through zircon U–Pb geochronologic study of volcanic rocks in Longquan area of southern Zhejiang Province, a batch of high precision chronologic data were obtained. These zircon U–Pb ages are between 163 Ma to 145 Ma which were confirmed by SHRIMP and LA–ICP–MS. These data indicate that large-scale volcanic activity in Zhejiang Province began with Late Jurassic. According to geochemical characteristics and Sr–Nd isotope analysis, these Late Jurassic volcanic rocks belong to peraluminous and high potassium Ca–alkaline series characterized by high SiO₂, K₂O but low P₂O₅, FeO and MgO. Due to the subduction of the Pacific plate in Late Mesozoic, the lower crust material (basement metamorphic rocks) was extensively melted and the late Jurassic volcanic–magmatic rocks in this area were formed. In addition, the authors propose defining a new rock–stratigraphic unit named “the Late Jurassic Huangmaojian Group” so as to better express and contrast.

Keywords: Zircon U–Pb geochronology; Late Jurassic; volcanic rocks; southern Zhejiang; Huangmaojian Group; geological survey engineering

收稿日期:2018–07–05; 改回日期:2019–03–06

基金项目:中国地质调查局项目(12120114043101)、浙江省省基础性公益性战略性地质工作项目([省资]2018007,[省资]2018006)共同资助。

作者简介:刘远栋,男,1986年生,硕士,工程师,主要从事区域地质调查工作;E-mail:lyd661106@163.com。

About the first author: LIU Yuandong, male, born in 1986, engineer, master, engaged in regional geological survey; E-mail: lyd661106@163.com.

Fund Support: Supported by China Geological Survey Project(No.12120114043101) and Basic Public Welfare Strategic Geological Project of Zhejiang Province (Provincial Capital:2018006, 2018007).

1 引言

浙江地处中国东部滨西太平洋大陆边缘,晚中生代火山活动强烈,陆相火山-沉积地层分布广泛,出露面积达55700 km²。依据野外产状该套火山-沉积地层分为上、下两个火山岩系,其中下火山岩系(浙西称建德群,浙东为磨石山群)出露更为广泛。下火山岩系时代属晚侏罗世还是早白垩世长期存在争议,20世纪80—90年代通过古生物化石以及K-Ar法(个别Rb-Sr法)测年研究,主流观点认为其属晚侏罗世(丁保良等,1987;浙江省地质矿产局,1989,1996;马武平,1994;包超民等,1999)。近年来获得的大量高精度同位素年代学数据及生物地层学研究新进展均表明其成岩时代主要为早白垩世(蒋维三,1995;徐步台等,1997;俞云文等,1999;陈丕基,2000;陶奎元等,2000;汪庆华等,2001;顾知微,2002,2005;邢光福等,2004,2008;张家菁等,2009;段政等,2013;王加恩等,2016),其LA-ICP-MS和SHRIMP锆石U-Pb同位素年龄主要集中于140~118 Ma,部分学者据此提出浙江省可能不存在晚侏罗世火山岩(陶奎元等,2000;汪庆华等,2001)。然而,与浙江省磨石山群相对应的福建省南园组地层中已被证实存在大量的晚侏罗世火山岩(邢光福等,2008;皇家龙等,2008;戴洪文,2011;郑克丽,2012)。那么为何进入到浙江省就缺失晚侏罗世火山岩,是真的不存在抑或只是尚未发现?

笔者近年来在浙南龙泉地区开展浙江省1:5万铀湖、瑞洋幅区域地质矿产调查过程中,就浙西南火山岩地层时代开展了年代学工作,获得了一批高精度年龄数据,证实浙江省存在大面积的晚侏罗世火山岩,从而为解决浙江省是否存在晚侏罗世火山岩这一重要问题取得了新证据,为研究浙闽地区乃至整个华南地区中生代构造环境提供了新资料。

2 地质背景

研究区位于西太平洋活动大陆边缘,属浙闽粤

火山喷发带浙东南喷发亚带,大地构造位置处于江山-绍兴拼合带南东之华夏造山系。区内晚中生代火山岩分布广泛,出露面积约790 km²,约占基岩总面积的90%(图1b)。火山岩部分直接不整合于前泥盆纪变质岩之上,部分与早侏罗世枫坪组沉积岩呈角度不整合接触。区内潜火山岩零星出露,岩性主要有流纹斑岩、花岗斑岩、闪长岩、安山玢岩等,一般就位于火山机构中心或火山机构边缘,单个岩体面积一般1~3 km²,最大的约9 km²。

研究区晚中生代火山活动可分为3个旋回,第一旋回又分为3个亚旋回(图2),岩性以酸性火山碎屑岩、熔岩为主,夹极少量中酸性火山碎屑岩。3个火山活动旋回总体上具有连续演化的特征,未出现大的喷发间断,在岩性岩相组合上也未出现大的区别,反映晚侏罗世火山活动具有从强到弱直至停止的一个完整演化过程。

第I旋回第一亚旋回(I₁)表现为普林尼式火山爆发,底部形成一套分布广泛的面状分布的火山碎屑流相流纹质熔结凝灰岩,岩性相对单一、稳定,上部为一套空落相的流纹质凝灰岩堆积,火山活动后期随着喷发强度的渐弱,火山活动进入间歇性喷发阶段,期间形成若干沉积夹层;第二亚旋回(I₂)火山活动由弱变强,形成一套单一的碎屑流相流纹质熔结凝灰岩,末期有少量侵出相凝灰岩分布;第三亚旋回(I₃)火山活动停止,为喷发间断期,发育一套火口湖相沉积特征的火山碎屑沉积岩,伴随有极微弱的火山喷发,多分布于早期形成火口塌陷形成的破火山口周边,出露范围局限。

第II旋回为破火山复活阶段,形成大套的溢流相酸性熔岩流,岩性有流纹岩、石泡流纹岩,熔岩厚度最大可达2000 m以上。

第III旋回火山岩分布有限,主要分布于黄茅尖北侧以及南侧的几大高地上,岩性稳定,为一套火山碎屑流相流纹质熔结凝灰岩堆积,与下伏第I/II旋回火山岩之间为喷发不整合接触。该旋回火山活动时间短,在短暂的火山喷发后,末期表现为潜火山岩侵入活动,代表了晚侏罗世火山活动的结束。

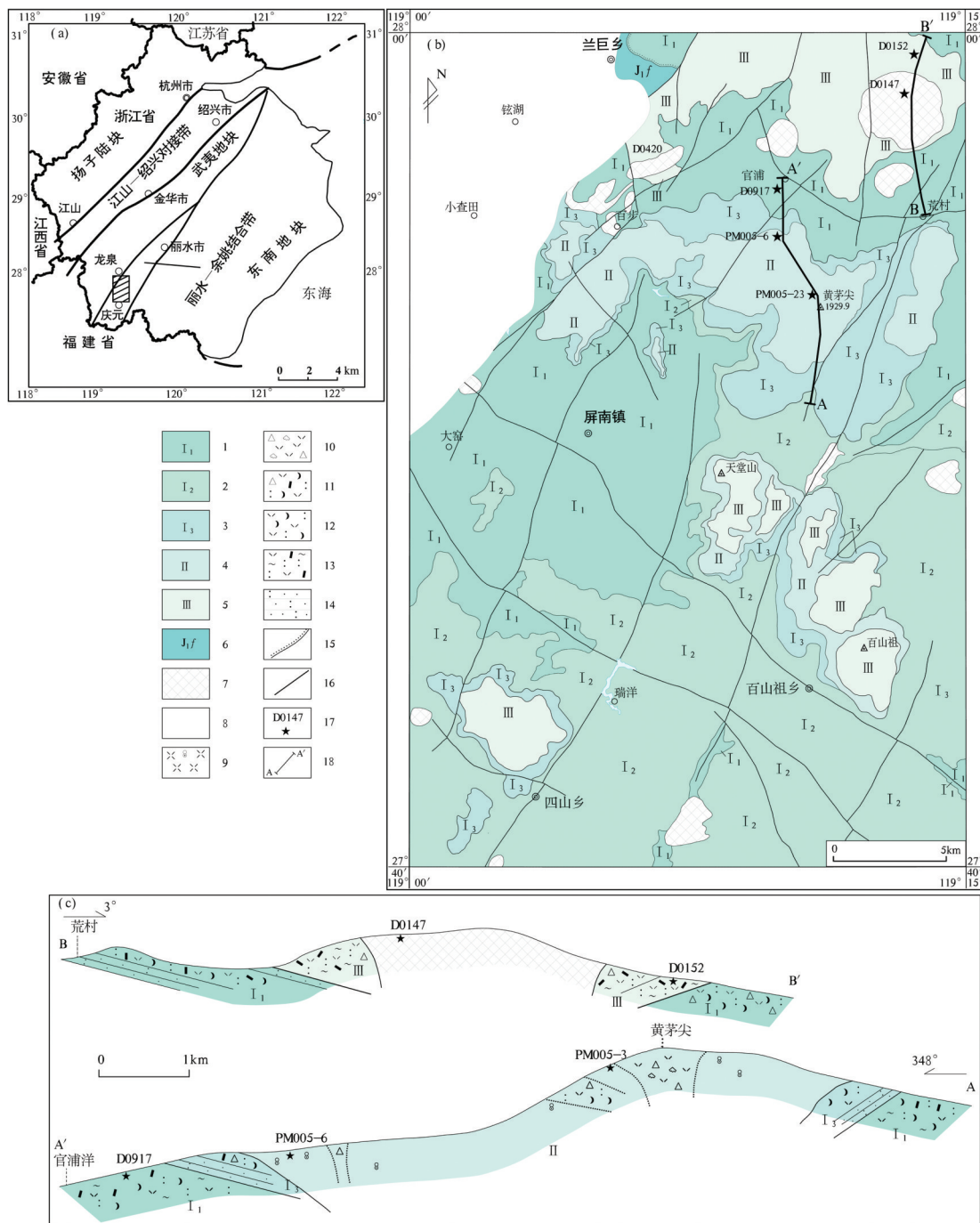


图1 研究区地质简图

- 1—第一旋回第一亚旋回火山岩;2—第一旋回第二亚旋回火山岩;3—第一旋回第三亚旋回火山岩;4—第二旋回火山岩;
- 5—第三旋回火山岩;6—早侏罗世枫坪组;7—潜火山岩;8—前泥盆纪变质岩、侵入岩;9—溢流相流纹岩/石泡流纹岩;
- 10—火山颈相集块角砾熔岩;11—空落相流纹质含角砾晶屑熔凝灰岩;12—流纹质屑熔凝灰岩;13—碎屑流相流纹质晶屑熔凝灰岩;
- 14—喷发沉积相凝灰质砂岩;15—角度不整合界线;16—断层界线;17—同位素采样位置及编号;18—剖面位置

Fig. 1 Geological map of the study area

- 1—Volcanic rocks of I₁ cycle;2— Volcanic rocks of I₂ cycle;3— Volcanic rocks of I₃ cycle;4— Volcanic rocks of II cycle;5— Volcanic rocks of III cycle;
- 6—Fengping Formation of early Jurassic;7—Subvolcanic rock;8—Pre-Devonian metamorphic rock and intrusive rock;9—Flooding rhyolite/lithophya rhyolite;
- 10—Volcanic neck facies breccia and conglomerate lava;11—Rhyolitic breccias crystal glass tuff formed by Empty stacked phase;
- 12—Rhyolitic glass tuff formed by Empty stacked phase;13—Rhyolitic crystal welded tuff formed by pyroclastic flow accumulation;
- 14— Tuffaceous sandstone formed from eruption-sedimentary;15—Angular unconformity;16—Fault;
- 17—Isotope sampling position;18—Profile position

旋回	亚旋回	岩性花纹	厚度/m	岩性组合	岩相特征
III			100~300	流纹质晶玻璃屑熔结凝灰岩	火山碎屑流相
II			150~500	流纹岩、石泡流纹岩, 夹流纹质凝灰岩	溢流相
I	I ₃		100~500	凝灰质砂岩, 夹流纹质晶玻璃屑凝灰岩	喷发沉积相夹空落相
	I ₂		100~300	流纹质(含角砾)晶屑熔结凝灰岩, 夹凝灰熔岩	火山碎屑流相
	I ₁		480~800	下部流纹质晶玻璃屑熔结凝灰岩, 夹流纹质角砾熔结凝灰岩; 上部流纹质晶玻璃屑熔结凝灰岩、流纹质(角砾)玻璃屑凝灰岩, 夹凝灰岩、凝灰质砂岩	早期火山碎屑流相; 晚期空落相夹喷发沉积相

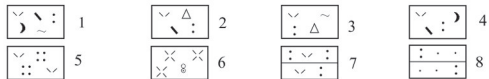


图2 研究区火山岩柱状图简图

1—流纹质晶玻璃屑熔结凝灰岩; 2—流纹质含角砾晶屑熔结凝灰岩; 3—流纹质角砾熔结凝灰岩; 4—流纹质晶玻璃屑凝灰岩; 5—流纹质凝灰熔岩; 6—(石泡)流纹岩; 7—流纹质凝灰岩; 8—凝灰质砂岩

Fig 2 Columnar section of the volcanic rocks in the study area
1-Rhyolitic crystal-vitric welded tuff; 2-Rhyolitic breccias crystal glass welded tuff; 3-Rhyolitic breccia welded tuff; 4-Rhyolitic crystal-vitric tuff; 5-rhyolitic tufflava; 6-Lithophysa rhyolite; 7-Rhyolitic tuff; 8-Tuffaceous sandstone

3 样品特征与测试方法

本次采集了各旋回、亚旋回中的火山岩及潜火山岩样品进行测试分析, 岩性主要有流纹质熔结凝灰岩、流纹岩和流纹斑岩等。

流纹质熔结凝灰岩: 呈熔结凝灰结构(图3a、b), 块状构造, 岩石由岩屑、晶屑、玻屑以及火山尘组成。岩屑含量一般在5%左右, 成分主要为流纹岩、凝灰岩等, 岩屑粒度一般0.2~2 mm, 少数为2~5 mm的角砾; 晶屑含量一般在10%~40%不等, 成分主要为石英、钾长石、斜长石, 少量的黑云母, 粒度一般0.2~2 mm; 塑性玻屑和火山尘含量在55%~85%不等, 多呈细条纹状、蚯蚓状等, 大部分边界较

模糊, 局部可见弯曲定向特征, 遇晶屑见其被压入, 中间变窄、变薄的现象, 部分保留鸡骨状外形, 已脱玻为隐晶状长英质, 部分为纤维状和微球粒状, 其间混杂少量火山尘。

流纹岩: 岩石多为斑状结构, 基质为隐晶-微晶结构, 多具流动构造, 部分具石泡-珍珠状构造(图3c、d)。斑晶成分多为石英, 少量的斜长石和黑云母等, 总含量仅2%~5%, 粒径一般0.2~1 mm; 基质以隐晶长英矿物为主, 部分石英、长石呈微晶粒状。部分岩石中发育球粒, 直径一般2~7 mm, 由多层同心球层构成, 球层为纤维放射状长英矿物、隐晶质, 球粒间局部可见重结晶粒状石英、斜长石、钾长石。

为了保证所分析样品新鲜, 首先对样品表面的风化层进行切除, 之后对岩石薄片进行显微观察。将挑选的每个新鲜样品称量约1 kg, 清洗烘干, 无污染完全粉碎至<200 μm, 使样品均匀具有代表性。主量元素地球化学在国土资源部杭州矿产资源监督检测中心完成, 主量元素采用SC100e X荧光光谱仪(BR00105)分析测试完成, 分析精度优于1%; 稀土微量元素采用ICP-MS方法分析完成, 测试仪器为Thermo X Serise II电感耦合等离子体质谱联用仪(SN01426C), 分析精度优于5%。Sr-Nd同位素在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室同位素室利用FinniganMAT-261多通道质谱仪测试完成, 详细的实验流程见Zhang et al.(2002)。Sr、Nd同位素比值测定分别采用⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.1194和¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.7219进行标准化。整个分析流程中实验本底为Sr<1 ng和Nd<50 pg, 标样NBS987 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.710275 ± 0.000005 (2σ), 标样JNdi-1的测定值为¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512119 ± 0.000008(2σ)。

锆石分选由河北省廊坊市尚艺岩矿检测技术服务有限公司完成。SHRIMP测年在北京离子探针中心完成, 详细的实验流程参见Williams et al.(1998)和宋彪等(2002), 数据处理采用Ludwing Squid 1.01和Isoplot程序(Ludwig, 2003)。单个测试点的误差均为1σ, ²⁰⁶Pb/²²⁸U年龄的加权平均值为95%置信度; LA-ICP-MS测年在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成, ICP-MS型号为Agilent7500型四级杆质谱仪, 激光剥蚀系统为NewWave公司产的UP-213固体激光剥蚀系统, 剥蚀孔径为30 μm, 以He气作为载气。质量

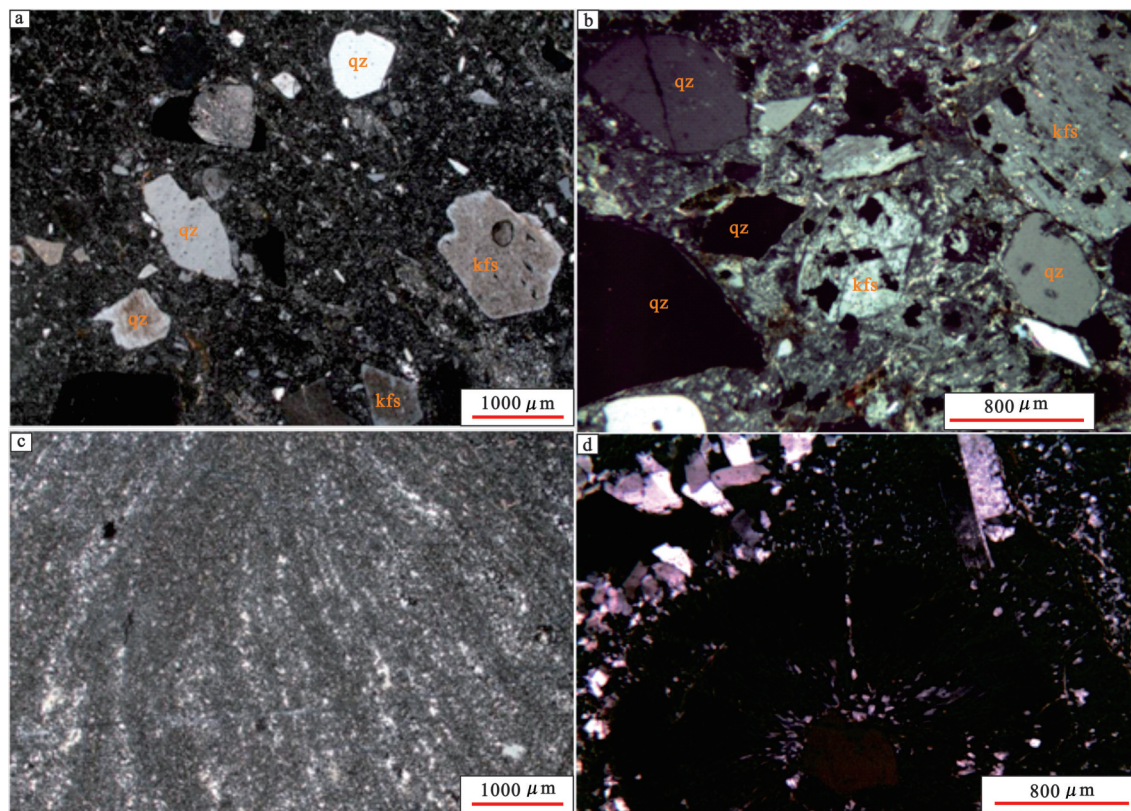


图3 流纹质熔结凝灰岩(a,b)、流纹岩(c)及石泡流纹岩(d)显微照片(正交偏光)
qz—石英;kfs—钾长石

Fig.3 Microphotograph of rhyolitic welded tuff (a, b), rhyolite (c) and lithophysa rhyolite (d)(crossed nicols)
qz—Quartz; kfs—K-feldspar

分馏校正采用锆石标样GJ-1。数据通过分析软件GLITTER计算获得同位素比值、年龄和误差,按照Andersen(2002)的方法进行普通铅校正,利用ISOPLOT软件完成加权平均年龄计算和U-Pb谐和图。同位素比值和年龄误差为 1σ ,加权平均年龄为95%置信度。

4 分析结果

4.1 锆石U-Pb年龄

为准确获得研究区火山活动时代信息,笔者在不同旋回、不同古火山机构的火山岩,以及侵入于其中的潜火山岩中采集了多组锆石U-Pb测年样品,本文选取其中最具代表性的5组测年数据(表1)进行详述,采样位置主要分布在黄茅尖周边(图1b),测年结果见表2。

研究区火山岩各主要岩性样品的锆石均透明,呈浅灰色,多呈不规则短柱状,长一般50~200 μm 不等,长宽比一般为2:1~4:1,阴极发光图像显示清晰

的韵律环带结构(图4)。所选4个火山岩样品和1个潜火山岩样品的锆石Th含量为 $(84\sim 2438)\times 10^{-6}$,U含量为 $(120\sim 4336)\times 10^{-6}$,其中火山岩样品的Th/U比值为0.37~1.27,潜火山岩样品Th/U比值较高,为1.15~3.52,均显示典型岩浆锆石特征。

样品D0917采自第I₁旋回,岩性为流纹质熔结凝灰岩,共测试11个点,除4号锆石年龄谐和度差外,其余10个分析点均位于谐和线上,其中6号测试点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $(233\pm 4)\text{Ma}$,为中三叠世的捕获锆石年龄,其余9个点的年龄值较为集中,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(163\pm 4)\text{Ma}$ (图5),为岩石的成岩年龄。PM005-6为采自第II₂旋回底部的流纹岩,所测16个分析点中,去掉5和11两个U含量极高的分析点后,剩余14个测点均位于谐和线上,且较为集中,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(156\pm 2)\text{Ma}$ (图5),为岩石的成岩年龄。PM005-23为采自第II₂旋回顶部的流纹岩,共选取14颗锆石进行测试,8号测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $(178\pm 4)\text{Ma}$,为

表1 锆石U-Pb测年结果
Table 1 Result of zircon U-Pb dating

岩石类型	样号	旋回/侵入旋回	岩性	测试方法	年龄/ Ma
火山碎屑岩	D0152	III	流纹质熔结凝灰岩	LA-ICP-MS 锆石U-Pb	145±2
	PM005-23	II	流纹岩	SHRIMP 锆石U-Pb	148±3
	PM005-6		流纹岩		156±2
		D0917	I ₁	流纹质熔结凝灰岩	
潜火山岩	D0147	III	流纹斑岩	LA-ICP-MS 锆石U-Pb	146±2

中一晚侏罗世的捕获锆石, 剩余 13 个分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 154~142 Ma, 其加权平均年龄为 (148±3) Ma (图 5), 代表岩石成岩年龄。D0152 为采自第 III 旋回的流纹质熔结凝灰岩, 选取 10 颗锆石进行测试, 10 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 147~141 Ma, 其加权平均年龄为 (145±2) Ma (图 5), 代表岩石成岩年龄。D0147 为采自侵入于第 III 旋回火山岩中的流纹斑岩潜火山岩体, 所选 12 颗锆石各测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 151~141 Ma, 其加权平均年龄为 (145±2) Ma (图 5), 代表岩石成岩年龄。以上测年结果表明, 研究区火山岩火山活动时主要介于 163~145 Ma, 属于晚侏罗世。

4.2 地球化学

岩石主量元素、微量元素、稀土元素测试结果见表 3、表 4 和表 5。

在 SiO_2 -全碱分类图上, 研究区火山岩主要落入流纹岩区域, 个别落入粗面岩区和英安岩区 (图 6a), 显示其岩性以酸性火山岩为主, SiO_2 含量较高, 为 67.62%~83.26%, 平均为 76.92%, 其 SiO_2 含量连续变化, 未出现双峰式特征; 全碱 ALK (ALK= $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) 变化大, 含量介于 3.29%~13.23%, 平均为 6.94%; Al_2O_3 含量介于 9.01%~15.76%, 平均为

12.29%; MgO 含量介于 0.06%~0.79%, 平均为 0.19%; CaO 含量 0.03%~2.65%, 平均为 0.33%。A/CNK 值介于 0.57~2.85, 平均为 1.48, 总体属于铝过饱和和类型, 在 A/CNK-A/NK 图解 (图 6b) 中主要落入过铝质区域 (其中粗面岩位于过碱质区域)。在 FAM 图解 (图 6c) 中, 研究区火山岩总体具有富碱、贫铁镁特征, 演化具 FeO 、 MgO 减少、ALK 增加的特征, 趋势线指向 A 端, 与钙碱性火成岩系列相符; 在 SiO_2 - K_2O 图解 (图 6d) 中火山岩主要显示高钾钙碱性系列特征, 少数点落入钙碱性区域。由此表明研究区晚侏罗世火山岩总体属富碱、贫铁镁的过铝质高钾钙碱性岩石系列。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图中 (图 7a), 各旋回火山岩总体特征相似, 表现出富集大离子亲石元素 Rb、Th、U、K 和高场强元素 Zr、Hf; 贫 Ba、Ta、Nb、Sr、P、Ti, 在蛛网图上均表现出明显的凹槽, 与俯冲带环境的钙碱性火山岩微量元素地球化学特征一致。所有样品的 Co、Ni 和 Cr 含量均很低 ($< 10 \times 10^{-6}$), 表现出壳源的特征 (刘春等, 2012)。

各样品稀土总量变化较大, 介于 13.22×10^{-6} ~ 436.02×10^{-6} , 总体偏低, 平均为 116.8×10^{-6} ; LREE/HREE 变化介于 2.39~16.22, 大多数 < 10 , 平均为

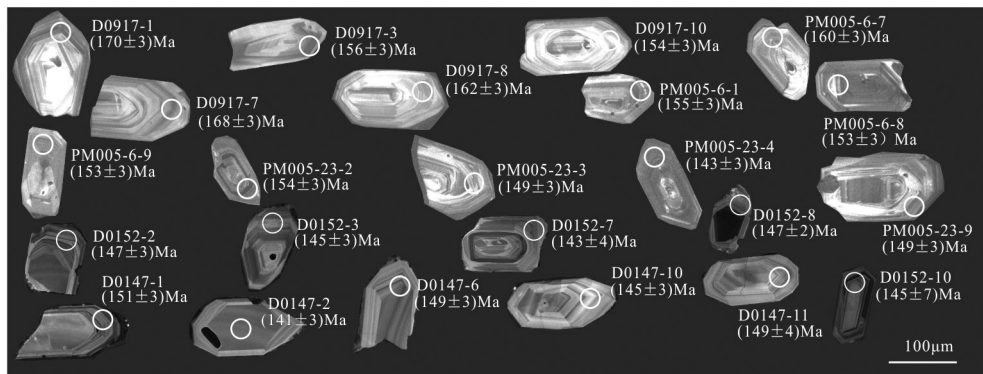


图4 研究区火山岩锆石 CL 图像

Fig.4 Zircon CL images of the volcanic rocks in the study area

表 2 研究区火山碎屑岩和潜火山岩锆石 U-Pb 分析结果

Table 2 Zircon U-Pb dating results of the pyroclastic rock and subvolcanic rock in the study area

Spot	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/10^{-6}$	SHRIMP U-Pb 同位素比值								表面年龄/Ma	
						$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}^* \pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^* \pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U} \pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U} \pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	1σ				
样品 D0917, I, 旋回流纹质晶屑熔结凝灰岩; 采样坐标: 119°10'06"E, 27°56'07"N; 11 个点加权平均年龄(163±4)Ma															
D0917-1	0.18	416	678	0.63	15.6	37.44	1.8	0.0487	3.0	0.1794	3.5	0.02671	1.8	169.9	3.0
D0917-2	0.78	84	178	0.49	3.88	39.74	2.0	0.0485	6.5	0.168	6.8	0.02516	2.0	160.2	3.2
D0917-3	1.61	715	518	1.43	11.1	40.74	1.9	0.0495	10.0	0.167	10	0.02455	1.9	156.3	2.9
D0917-4	0.41	298	450	0.68	11.0	35.18	1.8	0.0493	3.5	0.1932	4.0	0.02842	1.8	180.7	3.2
D0917-5	1.29	140	194	0.75	4.40	38.37	2.2	0.0482	10	0.173	11	0.02606	2.2	165.9	3.7
D0917-6	0.24	124	206	0.62	6.53	27.19	2.0	0.0511	5.4	0.259	5.8	0.03678	2.0	232.8	4.5
D0917-7	0.79	138	214	0.67	4.90	37.80	1.9	0.0488	4.8	0.1781	5.1	0.02645	1.9	168.3	3.1
D0917-8	0.52	150	210	0.74	4.63	39.25	1.9	0.0476	7.6	0.167	7.9	0.02548	1.9	162.2	3.1
D0917-9	1.48	97	120	0.83	2.71	38.73	2.1	0.0496	12	0.176	12	0.02582	2.1	164.3	3.4
D0917-10	0.68	133	163	0.84	3.42	41.25	2.0	0.0497	8.1	0.166	8.3	0.02424	2.0	154.4	3.0
D0917-11	0.54	136	167	0.84	3.74	38.60	1.9	0.0485	4.7	0.1732	5.1	0.02591	1.9	164.9	3.2
样品 PM005-6, II 旋回底部流纹岩; 采样坐标: 119°10'08"E, 27°55'05"N; 16 个点加权平均年龄(156±2)Ma															
PM005-6-1	0.35	486	889	0.57	18.7	41.02	1.9	0.0494	3.8	0.1660	4.3	0.02438	1.9	155.3	2.9
PM005-6-2	0.84	1023	831	1.27	17.7	40.76	1.9	0.0484	4.2	0.1636	4.7	0.02453	1.9	156.2	3.0
PM005-6-3	0.18	714	820	0.90	17.6	40.18	1.9	0.0486	2.5	0.1669	3.1	0.02489	1.9	158.5	3.0
PM005-6-4	0.23	575	1497	0.40	32.7	39.43	1.9	0.04911	1.9	0.1717	2.7	0.02536	1.9	161.4	3.0
PM005-6-5	3.98	2438	4336	0.58	103	37.52	1.9	0.0501	4.7	0.1843	5.1	0.02665	1.9	169.5	3.1
PM005-6-6	0.34	169	466	0.37	9.56	42.02	2.0	0.0497	3.5	0.1631	4.0	0.02380	2.0	151.6	2.9
PM005-6-7	0.90	413	672	0.64	14.7	39.70	2.0	0.0484	4.8	0.1683	5.2	0.02519	2.0	160.4	3.1
PM005-6-8	0.51	1667	1190	1.45	24.6	41.75	1.9	0.0487	2.9	0.1609	3.5	0.02395	1.9	152.6	2.8
PM005-6-9	0.19	657	794	0.85	16.4	41.60	1.9	0.0492	3.6	0.1629	4.1	0.02404	1.9	153.1	2.9
PM005-6-10	0.38	676	796	0.88	16.7	41.02	1.9	0.0488	2.8	0.1642	3.3	0.02438	1.9	155.3	2.9
PM005-6-11	3.23	1136	2115	0.55	49.9	37.64	1.9	0.0488	6.4	0.179	6.7	0.02656	1.9	169.0	3.1
PM005-6-12	0.02	403	595	0.70	12.0	42.68	1.9	0.0495	3.6	0.1598	4.1	0.02343	1.9	149.3	2.8
PM005-6-13	1.88	390	741	0.54	15.5	41.94	2.0	0.0506	6.6	0.166	6.9	0.02384	2.0	151.9	2.9
PM005-6-14	0.84	276	501	0.57	10.7	40.46	2.0	0.0502	6.3	0.171	6.6	0.02472	2.0	157.4	3.1
PM005-6-15	1.73	1480	1207	1.27	27.1	38.87	1.9	0.0487	5.1	0.1728	5.4	0.02573	1.9	163.8	3.1
PM005-6-16	0.49	538	707	0.79	14.9	41.02	1.9	0.0502	3.5	0.1688	4.0	0.02438	1.9	155.3	2.9
样品 PM005-23, II 顶部流纹岩; 采样坐标: 119°11'06"E, 27°53'42"N; 14 个点加权平均年龄(148±3)Ma															
PM005-23-1	13.53	545	844	0.67	19.3	43.4	2.4	0.052	27	0.164	27	0.02304	2.4	146.9	3.5
PM005-23-2	3.29	847	1315	0.67	28.2	41.42	1.9	0.0492	7.5	0.164	7.7	0.02414	1.9	153.8	2.9
PM005-23-3	0.47	216	492	0.45	9.90	42.92	1.9	0.0486	3.3	0.1560	3.8	0.02330	1.9	148.5	2.8
PM005-23-4	-	622	1065	0.60	20.5	44.52	1.9	0.0496	2.7	0.1536	3.3	0.02246	1.9	143.2	2.7
PM005-23-5	0.39	336	571	0.61	11.9	41.42	1.9	0.0471	4.2	0.1567	4.6	0.02415	1.9	153.8	2.9
PM005-23-6	0.00	415	670	0.64	13.1	44.09	1.9	0.0500	2.4	0.1563	3.0	0.02268	1.9	144.6	2.7
PM005-23-7	0.29	460	815	0.58	16.6	42.27	1.9	0.0476	3.5	0.1553	4.0	0.02366	1.9	150.7	2.8
PM005-23-8	1.20	384	682	0.58	16.6	35.66	2.0	0.0476	6.1	0.184	6.4	0.02804	2.0	178.3	3.5
PM005-23-9	0.09	369	512	0.75	10.3	42.89	1.9	0.0496	3.1	0.1595	3.6	0.02332	1.9	148.6	2.8
PM005-23-10	0.32	407	625	0.67	12.8	41.99	1.9	0.0490	3.6	0.1609	4.1	0.02381	1.9	151.7	2.9
PM005-23-11	-	516	869	0.61	18.0	41.37	1.9	0.04768	2.0	0.1589	2.7	0.02417	1.9	154.0	2.9
PM005-23-12	0.80	565	1033	0.57	20.9	42.78	1.9	0.0488	4.4	0.1574	4.8	0.02338	1.9	149.0	2.8
PM005-23-13	0.23	326	647	0.52	13.0	43.00	1.9	0.0474	3.0	0.1521	3.6	0.02326	1.9	148.2	2.8
PM005-23-14	0.40	408	707	0.60	13.5	44.99	1.9	0.0501	3.9	0.1536	4.4	0.02223	1.9	141.7	2.7

续表2

Spot	Th/ 10 ⁻⁶	U/ 10 ⁻⁶	Th/U	LA-ICP-MS U-Pb同位素比值						同位素年龄/Ma					
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
样品 D0152, III 旋回流纹质熔结凝灰岩; 采样坐标: 119°13'28"E, 27°59'49"N; 10 个点加权平均年龄(145±2) Ma															
D0152-1	237	457	0.52	0.0506	0.00466	0.1534	0.01332	0.02252	0.00064	233.4	200.0	144.9	11.7	143.6	4.1
D0152-2	333	263	1.27	0.0530	0.00398	0.1582	0.01056	0.02307	0.00054	327.8	176.8	149.1	9.3	147.1	3.4
D0152-3	354	305	1.16	0.0529	0.00378	0.1632	0.01132	0.02276	0.00053	324.1	162.9	153.5	9.9	145.1	3.3
D0152-4	291	264	1.10	0.0526	0.01146	0.1564	0.03046	0.02229	0.00138	322.3	421.9	147.6	26.8	142.1	8.7
D0152-5	279	437	0.64	0.0518	0.00474	0.1540	0.01325	0.02203	0.00079	276.0	211.1	145.4	11.7	140.5	5.0
D0152-6	490	442	1.11	0.0533	0.00316	0.1624	0.00954	0.02221	0.00041	342.7	130.5	152.8	8.3	141.6	2.6
D0152-7	335	306	1.10	0.0534	0.0057	0.1647	0.01738	0.02240	0.00065	346.4	242.6	154.8	15.2	142.8	4.1
D0152-8	2036	3097	0.66	0.0488	0.00133	0.1561	0.00453	0.02312	0.00025	200.1	69.4	147.3	4.0	147.3	1.6
D0152-9	234	266	0.88	0.0482	0.01142	0.1515	0.03687	0.02230	0.00129	109.4	477.7	143.2	32.5	142.1	8.1
D0152-10	597	1000	0.60	0.0541	0.00774	0.1663	0.02197	0.02278	0.00104	376.0	358.3	156.2	19.1	145.2	6.6
样品 D0147, 流纹斑岩; 采样坐标: 119°12'18"E, 27°58'12"N; 12 个点加权平均年龄(145±2) Ma															
D0147-1	351	222	1.58	0.0490	0.0024	0.1598	0.0078	0.0237	0.0005	147	114	151	7	151	3
D0147-2	419	218	1.93	0.0495	0.0027	0.1508	0.0079	0.0221	0.0004	173	123	143	7	141	3
D0147-3	567	289	1.96	0.0496	0.0022	0.1538	0.0068	0.0225	0.0004	176	105	145	6	143	3
D0147-4	351	201	1.74	0.0503	0.0029	0.1534	0.0086	0.0221	0.0005	207	134	145	8	141	3
D0147-5	338	230	1.47	0.0494	0.0019	0.1595	0.0062	0.0234	0.0004	168	92	150	5	149	3
D0147-6	373	220	1.69	0.0490	0.0023	0.1520	0.0070	0.0225	0.0004	150	108	144	6	143	3
D0147-7	665	339	1.96	0.0499	0.0016	0.1543	0.0050	0.0224	0.0004	190	77	146	4	143	2
D0147-8	786	412	1.91	0.0499	0.0023	0.1597	0.0071	0.0232	0.0004	189	107	150	6	148	3
D0147-9	217	164	1.32	0.0492	0.0024	0.1540	0.0073	0.0227	0.0004	159	112	145	6	145	3
D0147-10	291	224	1.3	0.0494	0.0047	0.1589	0.0146	0.0233	0.0007	169	216	150	13	149	4
D0147-11	498	381	1.31	0.0488	0.0014	0.1524	0.0043	0.0227	0.0003	136	67	144	4	144	2
D0147-12	765	561	1.36	0.0495	0.0012	0.1591	0.0038	0.0233	0.0003	170	56	150	3	149	2

8.13; (La/Yb)_N 值主体 > 1, 介于 1.45~33.96, 在球粒陨石标准化图中(图 7b) 总体显示弱的右倾型; 各样品均显示不同程度的 Eu 负异常, 显示明显的 "V" 形谷(图 7b), δEu 值介于 0.09~0.75, 平均为 0.40, 指示斜长石的结晶分异, 并且从 I → II → III 旋回火山岩 δEu 值显示递减规律, 表明岩浆演化后期结晶分异作用加强; Ce 含量特征主要分两组, 一组为无异常或弱的异常, 该组 δCe 介于 0.79~1.23; 另一组表现明显的 Ce 正异常, δCe 介于 1.45~6.10。

4.3 Sr-Nd 同位素组成

研究区火山岩全岩 Sr-Nd 同位素成分列于表 6。火山岩的 I_{Sr} 值介于 0.615~0.720, 其中 2 个样品 I_{Sr} 值分别为 0.615 和 0.673, 明显偏低, 可能是由于样品对 Rb-Sr 体系没有保持封闭, 或者由于样品的 Rb/Sr 值太大, Rb 即使具有轻微活动性也会对计算结果产

生很大的影响, 因此讨论中不涉及这 2 个样品的 I_{Sr} 值。其余数据集集中于 0.714~0.720。Nd 同位素比值 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.511 77~0.511 90, ε_{Nd}(t) 值介于 -15.22~-13.3, 平均为 -14.46。

5 讨论

5.1 锆石 U-Pb 年龄的地质意义

根据国际地层表(2015 年) 采用 145 Ma 作为白垩系-侏罗系的界线年龄, 研究区火山活动时代介于 163~145 Ma, 属于晚侏罗世, 并且从底到顶火山岩相出露完整, 各旋回演化规律清楚, 火山机构面貌清晰, 这是目前为止浙南地区发现的最完整的晚侏罗世火山岩剖面。近几年开展的地质调查项目中, 在浙东南地区已发现零星的晚侏罗世火山岩, 如在丽水市云和县南坑村、坑口村两地的大爽组火山岩中

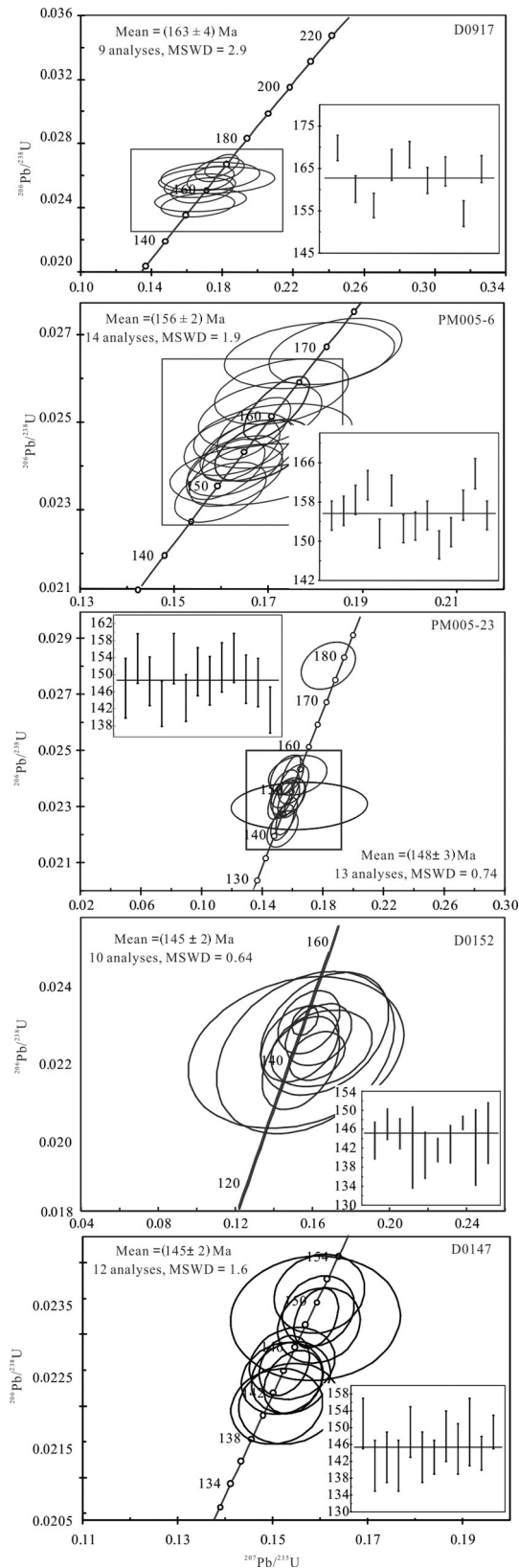


图5 研究区晚侏罗世火山岩锆石U-Pb年龄谱和图
Fig.5 Zircon U-Pb concordia diagrams of the volcanic rocks
in the study area

分别获得 152 Ma 和 154 Ma 的成岩年龄^①,在嵊州市长乐镇东园一带大爽组底部火山碎屑岩和安山岩中分别获得 154 Ma 和 145 Ma 的成岩年龄^②,这些地区晚侏罗世火山岩之上多被早白垩世火山物质覆盖,出露有限。本研究区出露大面积的晚侏罗世火山岩,其总厚度可达 3000 m 以上,表明浙东南大规模的火山活动始于晚侏罗世,而非早白垩世。

5.2 火山岩成因探讨

研究区火山岩以酸性火山岩为主,属于高钾钙碱性火山岩,具有右倾轻稀土富集的分配模式,以及 K、Rb、Th、U、Zr 富集和 Ta、Nb、Sr、P、Ti 亏损的微量元素特征。岩石 Th/Ta 比值大都集中于 6.25~20.56,与活动大陆边缘火山岩特征(Th/Ta=6~20)基本一致,少量样品偏向洋内岛弧火山岩(Th/Ta 略大于 20)(Michael, 2000)。在 Th/Ta-Yb 和 Ta/Yb-Th/Yb 构造环境判别图解上,样品主要落在活动大陆边缘区,少部分落入洋内岛弧区域(图 8a、b)。火山岩 Sr 含量极低,介于 7.0×10^{-6} ~ 267.0×10^{-6} ,并且除 3 个样品 $> 100 \times 10^{-6}$,其他都 $< 61.4 \times 10^{-6}$,Y 和 Yb 含量较高,分别为 9.72×10^{-6} ~ 47.93×10^{-6} 、 0.78×10^{-6} ~ 4.79×10^{-6} ,平均分别为 20.55×10^{-6} 和 2.23×10^{-6} ,这种低 Sr 高 Yb 特征也显示其物源具有岛弧地壳熔融特征(张旗等, 2006, 2010)。在 Rb/10-Hf-Ta*3 三角图解(图 8d)中,样品点均落入碰撞大地构造环境的花岗岩区域;在里特曼-戈蒂尼指数图(图 8c)上,投影点均落入造山带火山岩区,并且多数位于日本岛弧火山岩平分线右侧;利用 Pearce et al. (1984) 判别花岗质岩石构造环境的 Rb-(Yb+Ta) 和 Rb-(Y+Nb) 相关图解(图 8e、f)对研究区火山岩构造环境进行判别,各样品主要显示火山弧和碰撞花岗岩过渡特征。以上构造环境判别结果表明,研究区晚侏罗世火山岩形成可能与板块俯冲作用有关。

研究区火山岩的 I_{sr} 值大部分低于大陆地壳的平均值 0.7190,高于地壳与地幔的分界值 0.7060。在 Sr 初始值与时间关系图中,主要落入下部壳源区域(图 9),一个数据显示上部壳源型特征,显示岩浆来源总体具有下部壳源型特征。Nd 模式年龄(t_{DM})是最常用来描述地壳中该同位素体系特征的重要参数之一,它可以把 Nd 同位素演化与地壳演化的时间联系起来。现有研究表明,岩浆结晶分异过程会导致 Sm/Nd 值的明显变化,对 t_{DM} 计算结果要产生较大

表3 研究区火山岩主量元素(%)测试结果
Table 3 Major elements (%) of volcanic rocks in the study area

旋回	样品编号	岩石名称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失	DI	A/CNK
III	D0152	流纹质熔结凝灰岩	67.62	0.48	11.31	2.55	1.40	0.06	0.79	0.97	4.26	8.97	0.09	—	80.98	0.61
	D0736	流纹质熔结凝灰岩	77.10	0.07	13.55	1.57	0.45	0.03	0.15	0.09	0.08	4.38	0.02	2.22	87.83	2.69
	D0893	流纹质熔结凝灰岩	76.51	0.09	12.75	0.59	0.48	0.02	0.10	0.13	2.47	4.87	0.01	1.39	94.53	1.33
II	PM005-13	流纹岩	79.78	0.06	11.43	0.56	0.48	0.06	0.06	0.07	3.13	2.96	0.01	1.17	95.12	1.35
	PM005-18	流纹岩	76.79	0.08	12.43	0.40	0.32	0.05	0.13	0.30	2.85	5.19	0.01	0.91	95.54	1.15
	PM005-23	流纹岩	75.45	0.03	14.17	1.15	0.47	0.05	0.09	0.16	1.39	5.60	0.01	1.38	91.32	1.64
	D0041	流纹岩	81.22	0.02	11.09	0.66	0.23	0.02	0.14	0.34	0.07	4.94	0.01	1.25	91.75	1.82
	PM010-24	流纹岩	75.28	0.12	13.22	0.21	0.75	0.07	0.23	0.23	0.61	7.65	0.03	1.00	92.92	1.36
	PM011-14	流纹岩	83.26	0.07	9.01	0.04	0.11	0.02	0.10	0.19	0.16	5.57	0.01	0.96	96.09	1.36
	D0687	流纹岩	76.06	0.05	12.50	1.19	0.41	0.03	0.06	0.11	1.84	6.29	0.02	1.16	94.85	1.25
	D0891	流纹岩	77.91	0.07	11.84	0.53	0.41	0.05	0.07	0.10	2.13	5.56	0.01	0.92	95.93	1.22
I	PM010-22	流纹质熔结凝灰岩	76.64	0.18	12.21	0.58	0.70	0.08	0.24	0.27	1.51	5.83	0.03	1.17	93.16	1.32
	PM011-12	流纹质凝灰岩	78.08	0.16	11.64	1.09	0.11	0.08	0.14	0.19	1.57	4.62	0.02	1.78	93.24	1.47
	PM005-3	流纹质凝灰岩	81.84	0.01	11.12	0.98	0.52	0.03	0.10	0.16	0.07	3.22	0.01	1.86	89.63	2.85
	D0105	流纹质熔结凝灰岩	77.32	0.03	12.11	1.02	0.50	0.04	0.06	0.24	3.35	4.52	0.02	0.71	95.55	1.12
	PM017-62	流纹质熔结凝灰岩	77.38	0.12	11.99	0.70	0.57	0.04	0.14	0.30	2.47	4.63	0.02	1.06	94.05	1.25
	D2010	流纹质熔结凝灰岩	69.78	0.33	14.42	1.13	1.19	0.05	0.53	2.65	2.13	3.50	0.11	4.31	79.37	1.19
	D0917	流纹质熔结凝灰岩	78.10	0.08	11.90	0.59	0.48	0.03	0.17	0.05	0.78	6.25	0.01	1.41	94.13	1.47
	D2206-1	流纹质熔结凝灰岩	76.53	0.09	12.68	0.47	0.18	0.02	0.11	0.27	3.21	5.29	0.02	0.62	96.35	1.10
	D2206-2	流纹质熔结凝灰岩	69.47	0.41	15.76	1.98	1.06	0.06	0.70	0.34	3.08	4.80	0.07	1.74	87.61	1.45

表4 研究区火山岩微量元素测试结果(10⁻⁶)
Table 4 Trace elements (10⁻⁶) of volcanic rocks in the study area

旋回	样品号	Rb	Ba	Th	U	Nb	Ta	Sr	Zr	Hf	Cr	Ni	Co	Sc	Cs	Cd	Li	Rb/Sr
III	D0152	182	1139	23.4	3.3	16.2	1.2	137.8	198.6	6.2	0.7	8.5	1.3	4.9	4.3	0.3	17.0	1.32
	D0736	226	156	21.0	4.0	15.5	1.4	13.4	131.7	5.8	1.9	0.8	0.5	3.3	6.4	0.0	29.4	16.86
	D0893	197	178	5.9	4.6	19.6	0.9	26.2	119.5	5.0	—	0.2	0.2	0.9	3.0	0.1	15.0	7.53
II	PM005-13	134	114	2.2	4.5	13.3	0.6	7.0	89.9	3.9	—	0.5	0.5	0.0	1.9	0.1	26.0	19.09
	PM005-18	208	417	23.5	4.5	14.1	1.3	58.6	111.5	5.1	3.1	2.2	1.4	2.3	3.9	0.0	17.7	3.55
	PM005-23	277	270	22.1	2.9	15.9	0.2	25.5	112.6	5.3	3.4	3.3	<0.50	2.6	5.5	0.0	28.1	10.86
	D0041	292	245	21.1	3.1	18.5	1.5	14.4	99.8	4.4	2.6	0.3	0.2	2.5	6.6	0.0	29.7	20.26
	PM010-24	325	1111	22.8	4.8	16.2	1.2	54.5	162.0	6.3	1.7	2.8	0.6	5.5	5.2	0.1	12.8	5.97
	PM011-14	211	354	20.7	4.9	15.3	1.1	38.9	91.9	4.0	4.6	3.1	0.3	2.9	3.2	0.0	18.6	5.42
	D0687	270	276	23.7	4.0	17.4	1.6	36.3	118.4	5.2	4.9	0.5	0.4	2.7	5.6	0.2	15.6	7.45
	D0891	236	424	11.4	3.7	14.9	0.7	28.0	109.5	4.3	—	0.7	0.4	1.2	3.6	0.1	18.4	8.45
I	PM010-22	208	860	20.4	4.1	13.4	1.0	61.4	143.7	5.4	4.0	2.6	1.7	4.9	5.2	0.2	14.8	3.39
	PM011-12	199	551	22.4	5.3	14.7	1.0	43.8	134.4	5.5	1.6	4.5	2.0	4.9	8.7	0.2	17.5	4.55
	PM005-3	185	76	18.3	4.1	14.1	0.9	14.3	88.8	4.1	3.1	1.8	<0.50	2.2	3.4	0.0	34.2	12.96
	D0105	278	143	28.8	4.6	28.7	1.5	53.6	108.3	6.5	4.5	2.2	<0.50	5.1	6.3	0.0	22.7	5.18
	PM017-62	167	707	13.7	4.8	12.1	0.6	58.4	115.9	4.1	—	0.3	0.6	1.2	3.3	0.1	8.6	2.87
	D2010	128	661	18.0	3.4	9.4	0.6	267.0	161.7	4.5	—	1.2	3.1	1.8	13.7	0.1	17.9	0.48
	D0917	281	300	13.4	3.4	24.5	0.8	26.6	68.7	3.2	—	0.9	0.7	1.9	6.4	0.1	14.5	10.56
	D2206-1	198	505	16.3	2.7	21.9	1.1	40.5	134.5	6.0	3.7	1.8	0.2	6.5	2.0	0.3	13.8	4.89
	D2206-2	232	1059	24.7	2.2	14.3	0.8	129.3	234.1	9.4	8.7	3.6	3.8	6.4	5.9	0.1	23.6	1.80

表5 研究区火山岩稀土元素测试结果(10^{-6})
Table 5 REE abundances (10^{-6}) of volcanic rocks in the study area

旋回	样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ REE	δ Eu
III	D0152	70.68	113.10	14.36	56.50	9.60	1.40	9.32	1.07	6.15	1.07	3.37	0.43	2.96	0.41	28.64	290.41	0.45
	D0736	15.00	75.80	3.88	15.40	3.31	0.30	2.74	0.55	3.47	0.74	2.13	0.33	2.27	0.35	18.40	126.27	0.30
	D0893	7.69	18.79	2.69	10.38	2.80	0.20	2.81	0.46	2.97	0.59	1.83	0.23	1.95	0.24	16.04	53.64	0.22
II	PM005-13-2	0.80	10.44	0.21	0.80	0.17	0.04	0.26	0.03	0.15	0.03	0.11	0.02	0.15	0.02	0.95	13.22	0.61
	PM005-18-1	19.40	52.20	5.35	20.90	4.78	0.45	4.54	0.80	4.81	0.99	2.79	0.45	2.84	0.39	26.90	120.69	0.29
	PM005-23-2	4.95	33.21	1.42	6.59	1.77	0.14	1.89	0.44	3.13	0.71	2.27	0.35	2.46	0.38	20.06	59.69	0.23
	D0041	7.06	16.81	2.58	10.62	3.04	0.23	2.59	0.54	3.60	0.78	2.52	0.39	2.62	0.39	20.58	53.77	0.25
	PM010-24-1	48.10	91.70	12.70	48.70	10.10	1.21	7.91	1.22	6.60	1.22	3.42	0.54	3.16	0.47	35.30	237.05	0.40
	PM011-14-1	9.33	19.30	2.59	9.78	2.62	0.23	2.54	0.50	3.59	0.81	2.52	0.41	2.58	0.38	23.20	57.18	0.27
	D0687	24.80	61.70	6.72	26.60	5.75	0.44	4.97	0.80	4.91	1.00	3.04	0.45	3.08	0.46	27.60	144.72	0.25
	D0891	3.10	33.38	0.95	3.36	0.68	0.16	0.95	0.11	0.63	0.14	0.48	0.07	0.78	0.11	3.80	44.90	0.62
I	PM010-22-1	56.50	95.80	13.80	50.50	9.57	1.27	6.68	1.03	5.63	1.02	2.74	0.45	2.62	0.38	26.20	247.99	0.46
	PM011-12-1	10.50	68.90	2.76	10.00	2.37	0.29	1.99	0.42	2.75	0.59	1.99	0.35	2.19	0.36	17.00	105.46	0.40
	PM005-3-1	3.60	11.85	1.10	4.60	1.43	0.14	1.50	0.40	2.63	0.57	1.85	0.29	1.98	0.29	15.91	32.23	0.29
	D0105-1	17.80	40.65	5.40	24.93	7.21	0.20	6.74	1.34	7.82	1.62	4.88	0.70	4.79	0.68	47.93	124.78	0.09
	PM017-62	12.15	71.40	3.04	11.59	2.39	0.46	2.98	0.37	2.15	0.43	1.35	0.17	1.35	0.17	12.00	109.99	0.53
	D2010	35.50	68.32	8.03	29.32	4.98	1.22	4.86	0.54	2.51	0.42	1.24	0.13	1.05	0.13	11.57	158.24	0.75
	D0917-1	6.56	19.53	1.85	7.14	1.69	0.18	1.81	0.28	1.83	0.35	1.09	0.14	1.20	0.15	9.72	43.78	0.31
	D2206-1	19.60	35.00	5.84	23.40	6.12	0.58	4.62	0.69	4.37	0.93	2.36	0.39	2.16	0.33	21.50	106.39	0.32
	D2206-2	116.00	178.00	23.70	82.70	12.70	1.97	7.63	1.04	5.33	1.00	2.72	0.42	2.45	0.36	27.70	436.02	0.57

表6 火山岩Sr-Nd同位素组成
Table 6 Sr and Nd isotopic compositions of volcanic rocks

样品编号	岩石名称	旋回	年龄	Rb/ 10^{-6}	Sr/ 10^{-6}	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (1 σ)	I_{Sr}	Sm/ 10^{-6}	Nd/ 10^{-6}	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	I_{Nd}	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{2\text{DM}}/\text{Ga}$
D0152-1	流纹质熔 结凝灰岩	III	145	181.9	137.8	3.83	0.723960 \pm 0.000010	0.716	9.60	56.50	0.1027	0.511769	0.511671	-15.22	2.17
PM005-13-2	流纹岩		149	134.2	7.0	55.61	0.733152 \pm 0.000009	0.615	0.17	0.80	0.1276	0.511822	0.511697	-14.62	2.13
PM005-23-2	流纹岩	II	148	277.0	25.5	31.67	0.786202 \pm 0.000008	0.720	1.77	6.59	0.1622	0.511868	0.511711	-14.38	2.11
PM010-24-1	流纹岩		143	325.2	54.5	17.34	0.751413 \pm 0.000007	0.716	10.10	48.70	0.1254	0.511805	0.511687	-14.96	2.15
PM010-22-1	流纹质熔 结凝灰岩		147	208.0	61.4	9.83	0.735511 \pm 0.000007	0.715	9.57	50.50	0.1145	0.511820	0.51171	-14.42	2.11
D2010-1	流纹质熔 结凝灰岩	I	148	127.9	267.0	1.39	0.717122 \pm 0.000007	0.714	4.98	29.32	0.1027	0.511802	0.511703	-14.53	2.12
D0917-1	流纹质熔 结凝灰岩		162	281.2	26.6	30.69	0.743976 \pm 0.000010	0.673	1.69	7.14	0.1428	0.511899	0.511748	-13.30	2.03
D1089-1	流纹质熔 结凝灰岩		150	179.7	256.4	2.03	0.719456 \pm 0.000008	0.715	5.85	33.08	0.1069	0.511821	0.511717	-14.21	2.09

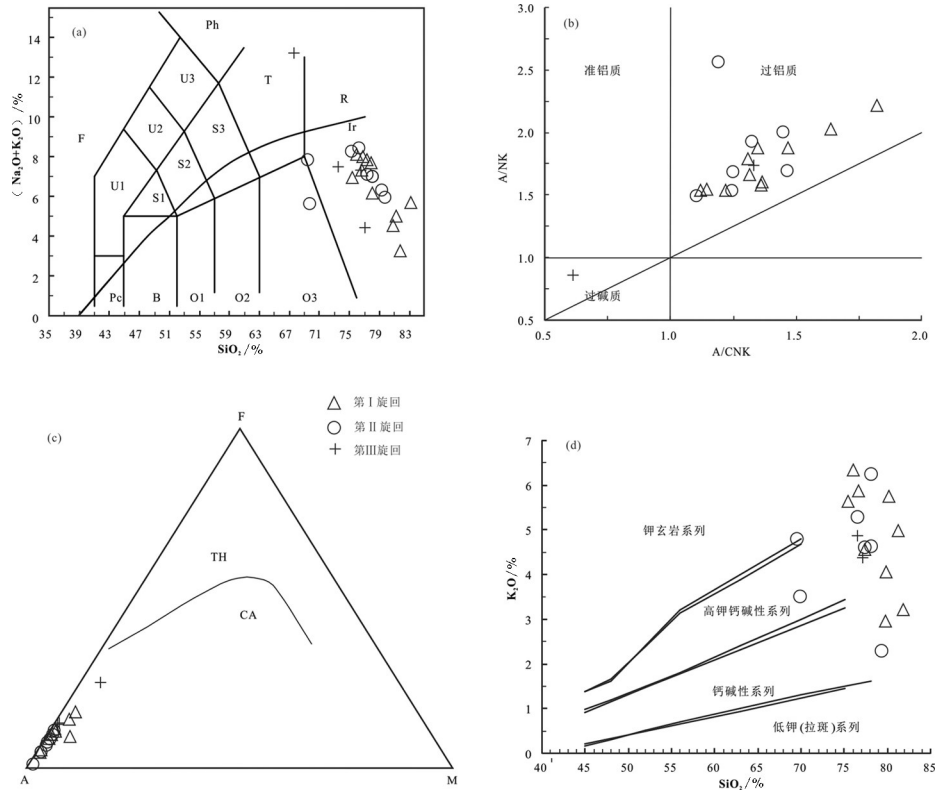


图6 研究区火山岩判别图解

a—火山岩 TAS 图解 (Le Maitre, 1989; Pc—苦橄玄武岩; B—玄武岩; O1—玄武安山岩; O2—安山岩; O3—英安岩; R—流纹岩; S1—粗面玄武岩; S2—玄武质粗面安山岩; S3—粗面安山岩; T—粗面岩、粗面英安岩; F—副长石岩; U1—碱玄岩、碧玄岩; U2—响岩质碱玄岩; U3—碱玄质响岩; Ph—响岩; Ir—Irvine 分界线, 上方为碱性, 下方为亚碱性); b—A/CNK—A/NK 图解 (Rickwood, 1989; Le Maitre et al., 1989); c—FAM 图解 (Irvine, 1971; TH—拉斑玄武岩系列; T—钙碱性火成岩系列); d—SiO₂—K₂O 图解 (据 Rickwood, 1989; Le Maitre et al., 1989)

Fig.6 Diagrams of the volcanic rocks in the study area

a—TAS plot for the volcanic rocks (after Le Maitre, 1989; Pc—Picrite basalt; B—Basalt; O1—Basaltic andesite; O2—Andesite; O3—Dacite; R—Rhyolite; S1—Trachybasalt; S2—Basaltic trachyandesite; S3—Trachyandesite; T—Trachyte, trachydacite; F—Feldspathoidite; U1—Tephrite, basanite; U2—Phonolitic tephrite; U3—Tephriphonolite; Ph—Pphonolite; Ir—Irvine boundary, upper is basic, lower is alkaline); b—A/CNK—A/NK plot (after Rickwood, 1989; Le Maitre et al., 1989); c—FAM plot (after Irvine, 1971; TH—Tholeiite series; T—Calc-alkaline series); d—SiO₂—K₂O plot (after Rickwood, 1989; Le Maitre et al., 1989)

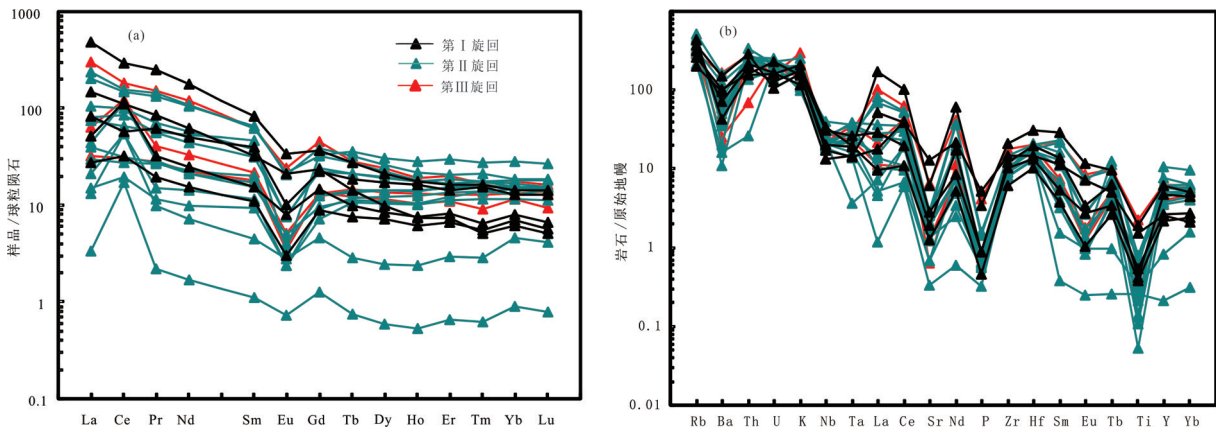


图7 火山岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)和球粒陨石标准化稀土配分图(b) (原始地幔和球粒陨石标准值均引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig.7 Primitive mantle-normalized trace element spidergram (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of volcanic rocks (after Sun and McDonough, 1989)

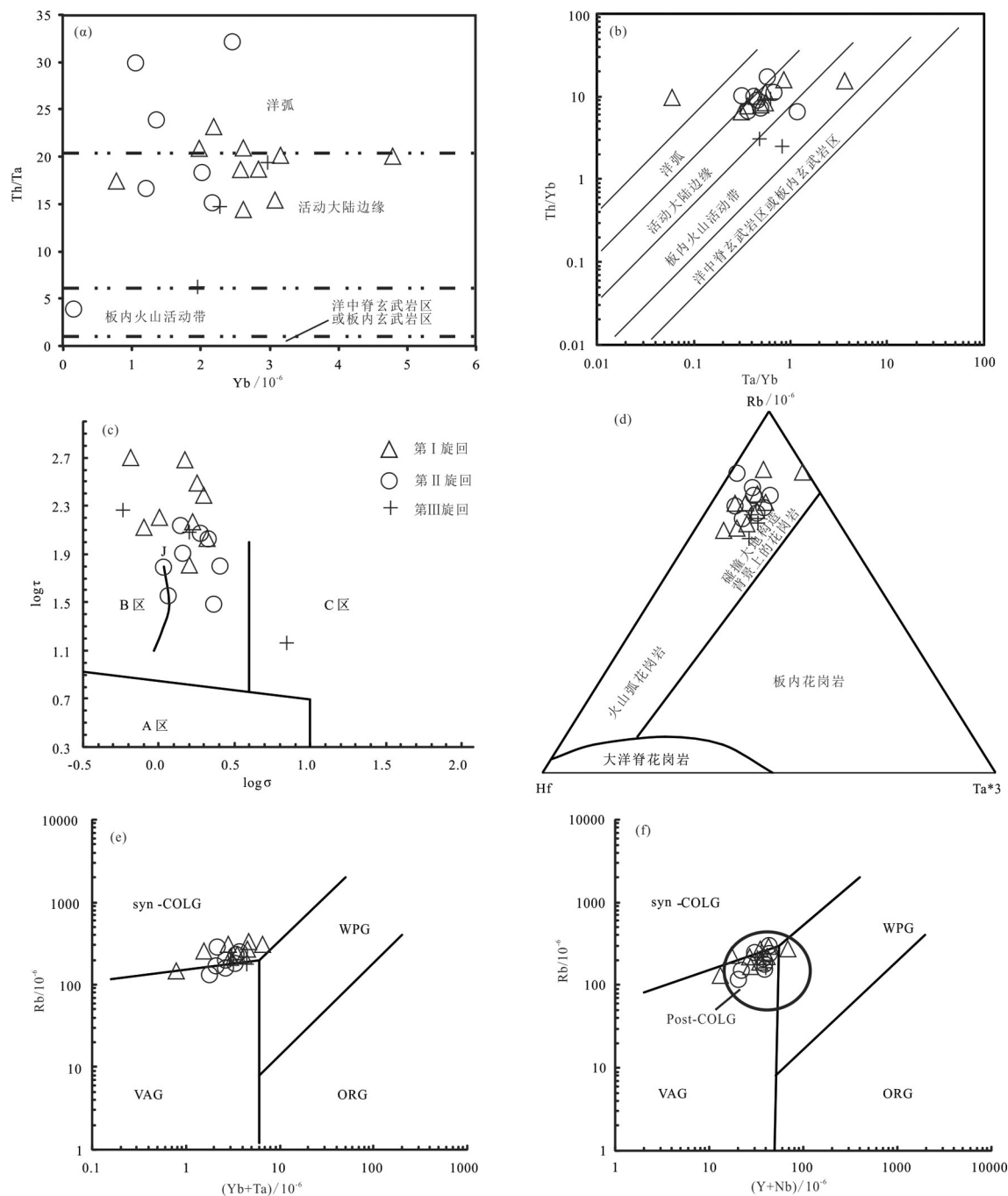
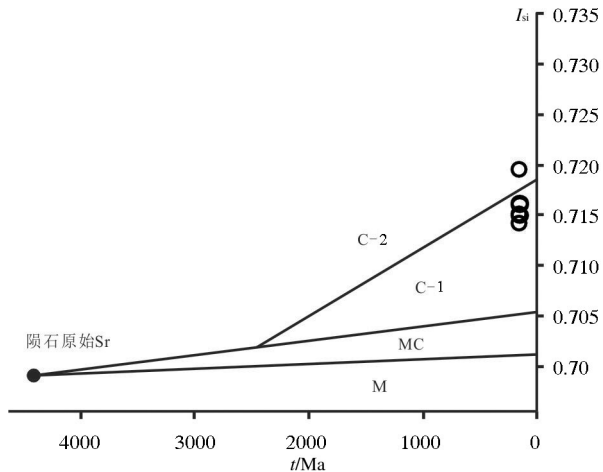


图8 火山岩构造环境判别图解

a—Yb—Th/Ta图解(Michael et al.,2000);b—Ta/Yb—Th/Ta图解(Michael et al.,2000);c—火山岩戈蒂尼—里特曼指数图解(A区—非造山带地区火山岩;B区—造山带地区火山岩(岛弧及活动大陆边缘);C区—A区、B区派生的碱性、富碱岩;J—日本火山岩);d—Rb/10—Hf—Ta*3三角图解(Wood, 1980);e—Rb—(Yb+Ta)图解;f—Rb—(Y+Yb)图解(VAG—火山岛弧;WPG—板内;syn—COLG—同碰撞;ORG—洋中脊)

Fig.8 Discrimination diagrams illustrating tectonic setting of the volcanic rocks

a—Yb—Th/Ta diagram (after Michael et al.,2000);b—Ta/Yb—Th/Ta diagram (after Michael et al.,2000);c—log τ —log σ diagram (A—Non-orogenic volcanic zone; B—Orogenic volcanic zone; C—Alkaline and alkaline-rich derived from A and B; J—Japanese volcanic rocks); e—Rb—(Yb+Ta) diagram; f—Rb—(Y+Yb) diagram (VAG—Volcanic arc; WPG—Within plate; syn—COLG—Syn-collisional; ORG—Mid-ocean ridge)

图9 火山岩年龄- I_{Sr} 值图

M—幔源型;MC—壳幔混合源;C-1—下部壳源型;
C-2—上部壳源型

Fig.9 Age- I_{Sr} of volcanic rocks

M—Mantle source; MC—Crust and mantle source;
C-1—Lower crust; C-2—Upper crust

影响。为了在最大程度上减少这种影响,本文采用两阶段演化模式 t_{DM} 计算公式和参数,计算结果列于表6。由表中可以看出,研究区火山岩的 t_{DM} 值位于 2.03~2.17 Ga, 与华夏地块基底变质岩的 Nd 模式年龄相似(1.8~2.2 Ga)(陈江峰等,1999),表明其物质来源与基底变质岩具有较大相关性。低的 t_{DM} 年龄表明其源区中含有较多的地幔组分,反之则表明源区以古老地壳组分为主,因此不难得出,测区火山岩物源主要以壳源为主。另外研究区火山岩 Sr 含量较低,为 7.0×10^{-6} ~ 267.0×10^{-6} ,与区域内基底古老的变质基底的 Sr 含量(81.53×10^{-6} ~ 357×10^{-6})(袁忠信等,1991;聂永红,1995)相似,也间接表明物质来源与基底变质岩的相关性。由此有理由认为研究区晚侏罗世火山岩岩浆来源是由先存的变质岩基底经部分熔融形成的。

华南早中生代晚期构造体制经历了从古特提斯构造域陆陆碰撞向滨太平洋构造域大洋板块俯冲的转换,构造体制转换的时代在早—中侏罗世(陈培荣等,1999;舒良树等,2002;邢光福等,2002,2008;Zhou et al., 2006;董树文等,2008;Shu et al., 2009;王对兴等,2015)。研究者在浙江的毛弄组、湘南、赣南、闽西南及粤东北一带均发现部分早中生代(180~190 Ma)的火山岩,其板内拉斑玄武岩和流纹质火山岩构成双峰式组合特征,指示了该时期

华南处于拉张环境。在进入中晚侏罗世后(约 165 Ma),区域逐渐进入太平洋板块构造域(Shu et al., 2009),在太平洋板块的俯冲作用下,区内逐渐进入挤压的大陆边缘弧环境,经历了挤压造山—剪切拉张过程(邢光福等,2002)。由于太平洋板块的俯冲作用,导致了俯冲带地壳广泛熔融,形成了本区大面积的晚侏罗世火山岩。

5.3 区域对比

如前所述,浙江省磨石山群火山岩的火山喷发时代主要处于早白垩世,时限大致为 140~118 Ma,与研究区的晚侏罗世火山活动存在较大时间差。据俞云文等(2001)研究,浙东南磨石山群下部 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值主要集中于-11~-8,磨石山群上部 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值主要集中于-7.7~-6.4,而位于磨石山群之上的永康群、天台群和衢江群的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值主要集中于-7.5~+0.1,可见浙东南火山岩随着火山岩浆演化, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值具有递增趋势,研究区火山岩也符合这一规律, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值介于-15.22~-13.3,明显低于浙东南其他地区的火山岩。可见研究区晚侏罗世火山岩与区域上磨石山群火山岩在火山活动时代以及同位素组成特征等方面均存在一定差异,不易笼统地将晚侏罗世火山岩归入磨石山群地层中。区域上与该套火山岩时代相当的地层是中侏罗世毛弄组,其主体岩性为一套含火山碎屑岩的含煤沉积地层,属山涧内陆河湖相碎屑沉积,因而与研究区火山岩在岩性组合、构造环境上均存在明显差异。邢光福等(2008)通过火山活动时差、区域构造环境差别、岩性岩相差别等方面对比,也认为福建省晚侏罗世火山岩与南园组为代表的早白垩世火山岩不仅分属不同的区域火山活动旋回,而且可能分属不同构造阶段的产物。通过以上对比,笔者认为有必要将此套晚侏罗世火山岩进行单独划分,以便今后地质工作中对比、研究。鉴于本次发现的大面积晚侏罗世火山岩主要分布于“江浙之巅”黄茅尖一带,且火山活动具有连续演化的特征,反映了火山活动由“强—弱—停止”的一个完整演化过程,笔者建议在浙江省磨石山群火山岩之下新建“晚侏罗世黄茅尖群”地层单位,并依据火山活动旋回特征再分若干“组”级地层单位。

6 结论

(1)在浙南龙泉地区发现大面积的晚侏罗世火

山岩,表明浙江省大规模的火山活动始于晚侏罗世,而非早白垩世,这为浙闽邻区火山活动及火山地层划分对比,乃至整个华南地区中生代构造演化研究提供了新资料。

(2)利用锆石U-Pb同位素测年技术,确定了晚侏罗世火山活动时限为163~145 Ma。

(3)岩石地球化学特征表明,研究区晚侏罗世火山岩具有高硅、高钾、富碱、低磷、贫铁镁的特征,属于过铝质高钾钙碱性系列岩石,其形成与晚中生代太平洋板块俯冲作用有关。Sr-Nd同位素特征表明其岩浆来源于下部地壳,与基底变质岩有关。由于太平洋板块的俯冲作用,导致了下部地壳广泛熔融,形成了龙泉地区大规模的火山岩浆活动。

(4)为了与早白垩世磨石山群区分,建议新建“晚侏罗世黄茅尖群”地层单位。

注释

①浙江省地质调查研究院. 2013. 1:5万双溪镇、丽水市、大港头镇、章村幅区域地质调查报告。

②南京地质调查中心. 2014. 1:5万崇仁镇、长乐镇、巍山镇、岭口幅区域地质调查报告。

References

- Atherton M P, Tarney J. 1979. Origin of granite batholiths: Geochemical evidence[J]. Mineralogical Society. Geochemistry Group: 1-148.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 192(1/2): 59-79.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Zhejiang Province. 1989. Regional Geology of Zhejiang Province[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Zhejiang Province. 1996. Stratigraphy (Lithostratic) of Zhejiang Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese with English abstract).
- Bao Chaomin, Wang Kongzhong. 1999. Mesozoic volcanic-sedimentary strata and tectonic movements in Zhejiang[J]. Regional Geology of China, 18(2): 201-204(in Chinese with English abstract).
- Chen Jiangfeng, Guo Xincheng, Tang Jiafu, Zhou Taixi, 1999. Nd isotopic model ages: Implications of the growth of the continental crust of southeastern China[J]. Journal of Nanjing University (Natural sciences), 35(6): 649-658(in Chinese with English abstract).
- Chen Peirong, Kong Xingong, Wang Yinxi, Ni Qisheng, Zhang Bangtong, Ling Hongfei. 1999. Rb-Sr Isotopic dating and significance of Early Yanshanian bimodal volcanic-intrusive complex from south Jiangxi Province[J]. Geological Journal of China Universities, 5(4): 378-383(in Chinese with English abstract).
- Chen Peiji. 2000. Comments on the Classification and Correlation of Non-marine Jurassic and Cretaceous of China[J]. Journal of Stratigraphy, 24(2): 114-119(in Chinese with English abstract).
- Ding Baoliang, Lan Shanxian, Wang Yingping. 1987. Discussion on the non-marine Juro-cretaceous boundary in Zhejiang, Fujian and Jiangxi Provinces[J]. Bull. Nanjing Inst. Geol. M.R., Chinese Acad. Geol. Sci., 8(3): 43-55(in Chinese with English abstract).
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Chen Xuanhua, Long Changxing, Wang Tao, Yang Zhenyu, Hu Jianmin. 2008. The formation and deformational characteristics of East Asia multi-direction convergent tectonic system in Late Jurassic[J]. Acta Geoscientica Sinica, 29(3): 306-317(in Chinese with English abstract).
- Dai Hongwen. 2011. On the relation between Late Jurassic volcanic rock and Intrusive rock in Panyang County of Fuan City, Fujian Province[J]. Geology of Fujian, 30(4): 335-340(in Chinese with English abstract).
- Duan Zheng, Xing Guangfu, Yu Minggang, Zhao Xilin, Jin Guodong, Chen Zhihong. 2013. Time sequence and geological process of Late Mesozoic volcanic activities in the area of Zhejiang-Fujian boundary[J]. Geological Review, 59(3): 454-469(in Chinese with English abstract).
- Gu Zhiwei. 2002. Review on the genus Ferganoconcha[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 41(1): 152-158(in Chinese with English abstract).
- Gu Zhiwei. 2005. On the Mincheian movement[J]. Journal of Stratigraphy, 29(1): 1-6(in Chinese with English abstract).
- Irvine T N, Barager W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 8: 523-548.
- Jiang Weisan. 1995. Discussion on the upper and basal limits of Cretaceous in Zhejiang Province[J]. Geology of Zhejiang, 11(1): 15-23(in Chinese with English abstract).
- Le Maitre R W. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms[M]. Oxford: Blackwell, 193.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, (4): 1-70.
- Liu Chun, Yan Jun, Song Chuanzhong, Ling Quanzhong, Peng Ge, Shi Lei, Liu Xiaoqiang. 2012. Geochronology and geochemistry of the volcanic rocks from Fanchang basin in the Middle-Lower Yangtze River: Petrogenesis and geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(10): 3228-3240(in Chinese with English abstract).
- Ma Wuping. 1994. Division of the late mesozoic strata in Zhejiang[J]. Journal of Stratigraphy, 18(2): 91-101(in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Michael P G, Eva S S. 2000. From continents to island arcs: A geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks[J]. *The Canadian Mineralogist*, 38: 1065–1073.
- Nie Yonghong, Li Shuguang, Ge Ningjie, Liu Deliang, Hu Xiongjian. 1995. Metamorphic features and ages of Garnet amphibolites in Beiyuan, Southwestern Zhejiang Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 15(4): 442–450(in Chinese with English abstract).
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *J. Petrol.*, 25: 956–983.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22: 247–263.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42 (1): 313–345.
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, Jian Ping. 2002. Mountmaking and procedure of the SHRIMP dating[J]. *Geological Review*, 48: 26–30(in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu, Zhou Xinmin. 2002. Late Mesozoic tectonism of Southeast China [J]. *Geological Review*, 48(3): 249 – 260(in Chinese with English abstract).
- Shu L S, Zhou X M, Deng P, Wang B, Jiang S Y, Yu J H, Zhao X X. 2009. Mesozoic tectonic evolution of the southeast China block: New insights from basin analysis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34: 376–391.
- Tao Kuiyuan, Xing Guangfu, Yang Zhuliang, Mao Jianren, Zhao Yu, Xu Naizhen. 2000. Determination of and discussion on the ages of mesozoic volcanic rocks in Zhejiang—Comments on the argumentation of Lapierre et al.[J]. *Geological Review*, 46(1): 14–21(in Chinese with English abstract).
- Williams I S. 1998. U–Th–Pb geochronology by ion microprobe[C]//Mickibben M A, Shanks III W C, Ridley W I(eds.). *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*. *Reviews in Economic Geology*, 7:1–35.
- Wang Qinghua. 2001. Discussion of ages of the Jiande group and the Moshishan group in Zhejiang[J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 22(3): 163–169(in Chinese with English abstract).
- Huang Jialong, Lu Qingdi, Zhang Zhengyi, Nie Tongchun, Zhou Guowu, Lin Min, Zheng Ping. 2008. Establishment of a neostatotype section for the Nanyuan Formation in the Yuanzhuang area, Xianyuan, Fujian, China, and revision of its age[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(6): 785–792(in Chinese with English abstract).
- Wang Duixing, Gao Wanli, Li Chunlin, Wang Zongxiu, Zhao Zhidan. 2015. LA–ICP–MS zircon U–Pb geochronology, petrochemistry of the Late Jurassic granite porphyry in central Zhejiang Province and their geological significance[J]. *Geology in China*, 42(6): 1684–1699(in Chinese with English abstract).
- Wang Jiaen, Wang Zhen, Liu Yuandong, Liang He. 2016. Geological age and structural environment of volcanic rocks from the Laocun Formation (Jiande group) [J]. *Journal of Stratigraphy*, 40(3): 262–271(in Chinese with English abstract).
- Xu Butai, Yu Yunwen. 1997. The isotopic ages of mesozoic volcanic rock in Zhejiang and their geological time[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 18: 117–119(in Chinese with English abstract).
- Xing Guangfu, Yang Zhuliang, Mao Jianren, Shu Liangshu, Shen Jialin, Sun Qianghui, Chen Rong, Tao Kuiyuan. 2002. Characteristics of early Jurassic igneous rocks on the continental margin of southeastern China and their tectonic significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(7): 384–391(in Chinese with English abstract).
- Xing Guangfu, Chen Rong, Yang Zhuliang, Shen Jialin, Zhou Yuzhang, Yu Minggang, Li Longming. 2004. Discussion on Mesozoic volcanic rocks in Fujian, Zhejiang and Jiangxi Provinces—Comments on Zheng et al.'s paper[J]. *Geology of Fujian*, 23(4): 233–239(in Chinese with English abstract).
- Xing Guangfu, Lu Qingdi, Chen Rong, Zhang Zhengyi, Nie Tongchun, Li Longming, Huang Jialong, Lin Min. 2008. Study on the ending time of Late Mesozoic tectonic regime transition in South China—Comparing to the Yanshan area in North China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 451–463(in Chinese with English abstract).
- Yuan Zhongxin, Wu Liangshi, Zhang Zongqing, Ye Xiaojiang. 1991. The Sm–Nd, Rb–Sr isotopic age–dating of Mayuan Group in northern Fujian[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 10(2): 127–132(in Chinese with English abstract).
- Yu Yunwen, Xu Butai. 1999. Stratigraphical sequence and geochronology of the Upper Mesozoic volcano–sedimentary rock series in Zhejiang[J]. *Journal of Stratigraphy*, 23(2): 136–145(in Chinese with English abstract).
- Yu Yunwen, Xu Butai, Chen Jiangfeng, Dong Chuanwan. 2001. Nd isotopic systematics of the Late Mesozoic volcanic rocks from southeastern Zhejiang Province, China: Implications for stratigraphic study[J]. *Geological Journal of China Universities*, 7 (1): 62–69(in Chinese with English abstract).
- Zhang H F, Gao S, Zhong Z Q, Zhang B R, Zhang L, Hu S H. 2002. Geochemical and Sr–Nd–Pb isotopic compositions of Cretaceous granitoids: Constraints on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultrahigh–pressure metamorphic belt, China[J]. *Chemical Geology*, 186(3/4): 281–299.
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, Wang Yuanlong, Jin Weijun, Jia Xiuqin. 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9):

- 2249–2269(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinmin, Sun Tao, Shen Weizhou, Shu Liangshu, Niu Yaoling. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanicrocks in South China: A response to tectonic evolution [J]. *Episodes*, 29(1): 26–33.
- Zhang Jiajing, Shi Guanghai, Tong Guaisheng, Zhang Zhiyu, Liu Hai, Wu Rongshi, Chen Lei. 2009. Geochemistry and geochronology of copper and polymetal-bearing volcanic rocks of the Erhuling Formation in Xujiadun, Zhejiang Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(6): 791–799(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jun Weijun, Li Chengdong, Wang Yuanlong. 2010. Revisiting the new classification of granitic rocks based on whole-rock Sr and Yb contents: Index[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 985–1015(in Chinese with English abstract).
- Zheng Keli. 2012. New researching development of Late Mesozoicvolcano formation in Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 31(4): 325–335(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 包超民, 王孔忠. 1999. 浙江中生代火山-沉积地层和构造运动[J]. *中国区域地质*, 18(2): 201–204.
- 陈江峰, 郭新生, 汤加富, 周泰禧. 1999. 中国东南地壳增长与Nd同位素模式年龄[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 35(6): 649–658.
- 陈培荣, 孔兴功, 王银喜, 倪琦生, 章邦桐, 凌洪飞. 1999. 赣南燕山早期双峰式火山-侵入杂岩的Rb-Sr同位素定年及意义[J]. *高校地质学报*, 5(4): 378–383.
- 陈丕基. 2000. 中国陆相侏罗、白垩系划分对比述评[J]. *地层学杂志*, 24(2): 114–119.
- 丁保良, 蓝善先, 汪迎平. 1987. 试论浙闽赣地区非海相侏罗、白垩纪界线[J]. *中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊*, 8(3): 43–55.
- 董树文, 张岳桥, 陈宣华, 龙长兴, 王涛, 杨振宇, 胡建民. 2008. 晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系的形成与变形特征[J]. *地球学报*, 29(3): 306–317.
- 戴洪文. 2011. 福建福安潘洋地区晚侏罗世火山岩与侵入岩的关系探讨[J]. *福建地质*, 30(4): 335–340.
- 段政, 邢光福, 余明刚, 赵希林, 靳国栋, 陈志洪. 2013. 浙闽边界区晚中生代火山作用时序与过程分析[J]. *地质论评*, 59(3): 454–469.
- 顾知微. 2002. 关于费尔干蚌 *Ferganoconcha*[J]. *古生物学报*, 41(1): 152–158.
- 顾知微. 2005. 论闽浙运动[J]. *地层学杂志*, 29(1): 1–6.
- 蒋维三. 1995. 试论浙江白垩系的顶、底界[J]. *浙江地质*, 11(1): 15–23.
- 刘春, 闫峻, 宋传中, 李全忠, 彭戈, 史磊, 刘晓强. 2012. 长江中下游繁昌盆地火山岩年代学和地球化学: 岩石成因和地质意义[J]. *岩石学报*, 28(10): 3228–3240.
- 马武平. 1994. 论浙江中生代晚期地层划分[J]. *地层学杂志*, 18(2): 91–101.
- 聂永红, 李曙光, 葛宁洁, 刘德良, 胡雄健. 1995. 浙西南北园八都群石榴斜长角闪岩的变质特征及年代[J]. *矿物学报*, 15(4): 442–450.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. *地质评论*, 48(增刊): 26–30.
- 舒良树, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代构造作用[J]. *地质论评*, 48(3): 249–260.
- 陶奎元, 邢光福, 杨祝良, 毛建仁, 赵宇, 许乃政. 2000. 浙江中生代火山岩时代厘定和问题讨论兼评Lapierre等关于浙江中生代火山活动时代的论述[J]. *地质论评*, 46(1): 14–21.
- 汪庆华. 2001. 试论浙江建德群和磨石山群时代[J]. *火山地质与矿产*, 22(3): 63–169.
- 皇家龙, 卢清地, 张正义, 聂童春, 周国武, 林敏, 郑平. 2008. 福建仙游园庄地区南园组新层型剖面的建立及时代的重新厘定[J]. *地质通报*, 27(6): 785–792.
- 王对兴, 高万里, 李春麟, 王宗秀, 赵志丹. 2015. 浙中地区晚侏罗世花岗岩斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 42(6): 1684–1699.
- 王加恩, 王振, 刘远栋, 梁河. 2016. 浙西建德群老村组火山岩地质时代及构造环境研究[J]. *地层学杂志*, 40(3): 262–271.
- 徐步台, 俞云文. 1997. 浙江中生代火山岩同位素年龄及地层时代归属[J]. *地球学报*, 18(增刊): 117–119.
- 邢光福, 杨祝良, 毛建仁, 舒良树, 沈加林, 孙强辉, 陈荣, 陶奎元. 2002. 东南大陆边缘早侏罗世火成岩特征及其构造意义[J]. *地质通报*, 21(7): 384–391.
- 邢光福, 陈荣, 杨祝良, 沈加林, 周宇章, 余明刚, 李龙明. 2004. 闽浙赣中生代火山岩研究问题浅议——兼与郑承意等商榷[J]. *福建地质*, 23(4): 233–239.
- 邢光福, 卢清地, 陈荣, 张正义, 聂童春, 李龙明, 皇家龙, 林敏. 2008. 华南晚中生代构造体制转折结束时限研究——兼与华北燕山区对比[J]. *地质学报*, 82(4): 451–463.
- 袁忠信, 吴良士, 张宗清, 叶笑江. 1991. 闽北麻源群 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素年龄研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 10(2): 127–132.
- 俞云文, 徐步台. 1999. 浙江中生代晚期火山-沉积岩系层序和时代[J]. *地层学杂*, 23(2): 136–145.
- 俞云文, 徐步台, 陈江峰, 董传万. 2001. 浙东南中生代晚期火山岩 Nd 同位素组成及其地层学意义[J]. *高校地质学报*, 7(1): 62–69.
- 浙江省地质矿产局. 1989. 浙江省区域地质志[M]. 北京:地质出版社.
- 浙江省地质矿产局. 1996. 浙江省岩石地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社.
- 张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. *岩石学报*, 22(9): 2249–2269.
- 张家菁, 施光海, 童贵生, 张智宇, 刘海, 吴荣土, 陈磊. 2009. 浙江徐家墩鹅湖岭组含铜多金属矿火山岩的地球化学与年代学[J]. *地质学报*, 83(6): 791–799.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 王元龙. 2010. 再论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类标志[J]. *岩石学报*, 26(4): 985–1015.
- 郑克丽. 2012. 福建晚中生代火山地层研究新进展[J]. *福建地质*, 31(4): 325–335.